

В.Т. Ерофеев В.Ф. Смирнов Е.А. Морозов

Микробиологическое разрушение материалов



МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов РФ
по образованию в области строительства в качестве
учебного пособия для студентов, обучающихся
по направлению 270100 «Строительство»

*Под общей редакцией члена-корреспондента РААСН
доктора технических наук профессора В. Т. Ерофеева
и доктора биологических наук профессора В. Ф. Смирнова*



Издательство Ассоциации строительных вузов
Москва 2008

УДК 620.1:691.32

ББК НЗ

М597

Авторский коллектив:

*В. Т. Ерофеев, В. Ф. Смирнов, Е. А. Морозов, Н. А. Атыкян,
О. Н. Смирнова, Д. А. Губанов, А. Д. Богатов, А. В. Дергунова*

Под общей редакцией *В. Т. Ерофеева* и *В. Ф. Смирнова*

Рецензенты:

кафедра «Биотехнология, физическая и аналитическая химия» Нижегородского государственного технического университета; член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, декан факультета городского, дорожного строительства и хозяйства Московского института коммунального хозяйства и строительства, заслуженный строитель РФ *В. И. Римшин*; министр жилищно-коммунального хозяйства Республики Мордовия *Р. И. Аширов*

М597 Микробиологическое разрушение материалов: Учеб. пособие / В.Т. Ерофеев, В.Ф. Смирнов, Е.А. Морозов и др.; под общ. ред. В.Т. Ерофеева и В.Ф. Смирнова – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 128 с.

ISBN 978-5-93093-551-6

Учебное пособие представляет собой систематизированное собрание теоретических и практических знаний в области биологического разрушения и биологического сопротивления строительных материалов и конструкций и долговечности зданий и сооружений в условиях биологически агрессивных сред. Приведены сведения об основных биодеградаторах материалов, описаны методы испытаний. Наиболее полно представлены виды и механизмы биодеградации строительных материалов в условиях воздействия бактерий, мицелиальных грибов и продуктов их метаболизма. Обоснованы методы защиты зданий и сооружений от биоповреждений.

Предназначено для студентов строительных специальностей направления подготовки дипломированных специалистов 270100 «Строительство» и направления подготовки бакалавров и магистров 270100.62 и 270100.68 «Строительство».

УДК 620.1:691.32

ББК НЗ

ISBN 978-5-93093-551-6

© Издательство АСВ, 2008

© В. Т. Ерофеев, В. Ф. Смирнов,
Е. А. Морозов, и др. 2008

© Оформление. Издательство
Мордовского университета, 2008

ПРЕДИСЛОВИЕ

Решение проблем, связанных с микробиологическим разрушением материалов и изделий, конструкций и оборудования, снижением опасности и интенсивности биологических загрязнений, защитой зданий и сооружений от биологической коррозии является чрезвычайно важной задачей. Биоповреждения вызываются макроорганизмами – животными, птицами, насекомыми, высшими растениями и микроорганизмами – бактериями, грибами, актиномицетами. При этом установлено, что более 40 % общего объема биоповреждений связано с деятельностью микроорганизмов. Ученные потери от биоповреждений только по 14 наиболее развитым странам Европы и Северной Америки достигают не менее 2 % от стоимости произведенной совокупной продукции, что составляет десятки миллиардов долларов ежегодно. Биоповреждения особенно характерны для перерабатывающих предприятий (мясомолочные и рыбные комбинаты), больниц, вокзалов, подземных сооружений, канализационных и коллекторных сетей и других объектов.

Следует отметить, что опасность и интенсивность микробиологических разрушений и загрязнений различных зданий и сооружений неуклонно возрастают в большей степени в городах, в пределах которых находятся крупные промышленные предприятия. Это усугубляется пренебрежением экологическими нормами при строительстве зданий и сооружений, невыполнением норм при их эксплуатации и т. д.

Поражения наблюдаются как в старых, так и в новых постройках. Эксперименты по изучению поведения материалов в условиях воздействия микроорганизмов и натурные обследования зданий и сооружений свидетельствуют о снижении прочностных показателей, разрушении бетонных и кирпичных изделий, отслаивании штукатурных покрытий, обесцвечивании или образовании пигментных пятен на лакокрасочных покрытиях, растворении стекла, разбухании шпатлевок. Более всего подвержены микробиологическому разрушению целлюлозосодержащие материалы. Например, грибы за несколько месяцев способны уничтожить конструкции из древесных материалов. При благоприятных условиях микроорганизмы разрушают железобетон, металлы и т. д. Исследования показывают, что во многих зданиях и сооружениях зараженность помещений микроорганизмами превышает предельно допустимую норму в несколько десятков и даже сотен раз. При этом процессы биоразрушений прогрессируют с каждым годом. Так, 10 июля 1999 года в г. Санкт-Петербурге обрушился козырек вестибюля станции метро «Сенная площадь». Биоповреждение железобетона явилось одной из причин трагедии, унесшей человеческие жизни.

Наряду со снижением срока службы зданий и сооружений, биоразрушения вызывают снижение уровня здоровья людей, приводят к потере трудоспособности. За счет ухудшения городской среды обитания микроорганизмы, содержащиеся на конструкциях, посредством движения воздушных потоков попадают в легкие человека, оседают на коже, вызывая различные болезни.

По статистическим данным, в 20 % случаев ослабленные больные умирают от микоза – поражения грибковой инфекцией (например, от аспергиллеза – заболевания, вызываемого грибами *Aspergillus*). 50 % заболеваний бронхиальной астмой связано с поражением микромицетами. Они же вызывают пенициллез, часто сопровождающийся воспалением суставов и костей. Например, журнал Европейского медицинского общества сообщает, что попавшие в человеческий организм мельчайшие дозы грибкового яда могут через несколько лет вызвать появление

раковых опухолей. Финскими специалистами подсчитано, что на лечение одного больного с аллергическим заболеванием затрачивается около 3 400 долларов в год.

Основными социально-экономическими последствиями биоповреждений объектов строительства и их элементов для населения являются снижение работоспособности и увеличение заболеваемости, для основных фондов – ускорение физического износа, увеличение количества отказов в работе оборудования, ухудшение состояния.

Система мер по защите элементов объектов строительства от биоповреждений осуществляется по двум направлениям:

а) обеспечение снижения отрицательного воздействия микроорганизмов на биологическое разрушение материалов;

б) получение новых фунгицидных и биостойких строительных материалов.

Таким образом, проблема биоповреждений многообразна и является исключительно актуальной. В связи с этим и подготовка проектировщиков, эксплуатационников, строителей должна осуществляться с учетом особенностей данной проблемы. Будущему специалисту нужно знать основные сведения о микроорганизмах разрушающих материалы различной природы и ухудшающих экологическую ситуацию в зданиях и сооружениях, методы борьбы с биоповреждениями. При этом любое применяемое решение, связанное с оценкой ущерба от биоповреждений и мероприятий по биозащите зданий и сооружений, должно сопровождаться экономическими расчетами. Экономический эффект от проведения биоохранных мероприятий заключается в предотвращении потерь живого и овеществленного труда и выражается в приросте прибыли или объема чистой продукции либо в экономии затрат на выполнение работ и оказание услуг, связанных с биоповреждением материалов.

Данное учебное пособие раскрывает основы теории и практики в области микробиологической коррозии материалов и способов повышения их биологического сопротивления. Оно призвано облегчить студентам, обучающимся по строительным специальностям, обучение учебным материалом, изучаемым в рамках дисциплин «Материаловедение. Технология конструктивных материалов», «Архитектурно-дизайнерское материаловедение», «Строительные материалы специального назначения», «Местные строительные материалы», «Отделочные материалы», «Гидроизоляционные и теплоизоляционные материалы», «Безопасность жизнедеятельности», «Экология», «Техническая эксплуатация зданий, сооружений и городских территорий» и т. д.

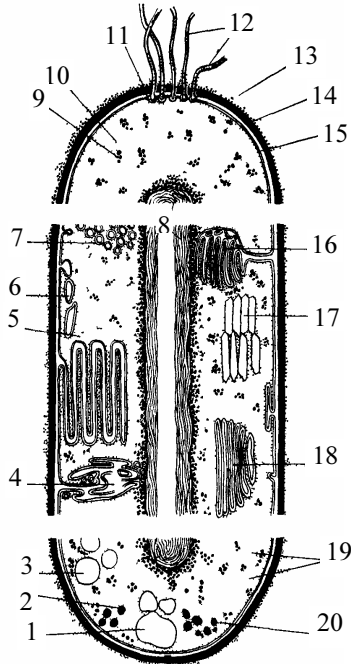
По мнению авторов в настоящее время назрела необходимость введения в учебный план новой дисциплины «Микробиологическое разрушение материалов», что будет способствовать более качественной подготовке студентов, бакалавров и магистров строительных специальностей направления 270100 «Строительство», а детальное рассмотрение вопросов микробиологических повреждений материалов и биозащиты конструкций зданий и сооружений способствует выработке стратегических подходов к решению стоящих перед наукой и практикой проблем.

Авторы приносят глубокую благодарность и признательность рецензентам: кафедре «Биотехнология, физическая и аналитическая химия» Нижегородского государственного технического университета (зав. кафедрой доктор химических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ *В. Р. Карташов*); член-корреспонденту РААСН, доктору технических наук, профессору, декану факультета городского, дорожного строительства и хозяйства Московского института коммунального хозяйства и строительства, заслуженному строителю РФ *В. И. Римшину*; министру жилищно-коммунального хозяйства Республики Мордовия *Р. И. Аширову*, за ценные рекомендации по улучшению содержания книги.

1. ОСНОВНЫЕ БИОДЕСТРУКТОРЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. БАКТЕРИИ

Бактерии являются одним из основных агентов микробиологической коррозии. Внутренняя организация клетки сложна (рис. 1.1). Каждая систематическая группа микроорганизмов имеет свои специфические особенности строения. Однако в общем случае можно сказать, что бактериальная клетка состоит из клеточной стенки, цитоплазмы, ядерного аппарата, внутрицитоплазматические структуры и органеллы.



Р и с. 1.1. Схематическое изображение строения бактериальной клетки (по Г. Шлегелю): 1 – гранулы поли-β-оксимасляной кислоты; 2 – жироподобные капли; 3 – включения серы; 4 – трубоччатые тилакоиды; 5 – пластинчатые тилакоиды; 6 – пузырьки; 7 – хроматофоры; 8 – ядро (нуклеоид); 9 – рибосомы; 10 – цитоплазма; 11 – базальное тельце; 12 – жгутики; 13 – капсула; 14 – клеточная стенка; 15 – цитоплазматическая мембрана; 16 – мезосома; 17 – газовые вакуоли; 18 – ламеллярные структуры; 19 – гранулы полисахарида; 20 – гранулы полифосфата.

Основные структуры бактериальной клетки представлены в верхней части рисунка дополнительные, мембранные структуры, имеющиеся у фототрофных и нефототрофных бактерий – в средней части, а включения запасных веществ – в нижней части.

Клеточная стенка – это плотный поверхностный слой, расположенный снаружи от цитоплазматической мембраны. Стенка выполняет защитную и опорную функции, а также придает клетке постоянную, характерную для нее форму (например, форму палочки или кокка) и представляет собой наружный скелет клетки. Внутри бактериальной клетки осмотическое давление в несколько раз, а иногда и в десятки раз выше, чем во внешней среде. Поэтому

клетка быстро разорвалась бы, если бы она не была защищена такой плотной, жесткой структурой, как клеточной стенкой. Толщина клеточной стенки 0,01 – 0,04 мкм. Она составляет от 10 до 50 % сухой массы бактерий.

Основным структурным компонентом стенок, основой их жесткой структуры является муреин (гликопептид, мукопептид). Это органическое соединение сложного строения, в состав которого входят сахара, несущие азот, – аминасахара и 4 – 5 аминокислот.

Клеточная стенка проницаема: через нее питательные вещества свободно проходят в клетку, а продукты обмена выходят в окружающую среду. Крупные молекулы с большим молекулярным весом не проходят через оболочку.

Цитоплазмой называется все содержимое клетки, за исключением ядерного аппарата и клеточной стенки. В жидкой, бесструктурной фазе цитоплазмы (матриксе) находятся рибосомы, мембранные системы, митохондрии, пластиды и другие структуры, а также запасные питательные вещества. Цитоплазма обладает чрезвычайно сложной, тонкой структурой (слоистая, гранулярная).

Внешний липопротеидный слой протопласта бактерий, обладающий особыми физическими и химическими свойствами, называется цитоплазматической мембраной. Цитоплазматическая мембрана выполняет очень важную роль – регулирует поступление веществ в клетку и выделение наружу продуктов обмена. Через мембрану питательные вещества могут поступать в клетку в результате активного биохимического процесса с участием ферментов. Кроме того, в мембране происходит синтез некоторых составных частей клетки. Наконец, в цитоплазматической мембране находятся важнейшие ферменты (биологические катализаторы). Упорядоченное расположение ферментов на мембранах позволяет регулировать их активность и предотвращать разрушение одних ферментов другими. Мембрана состоит из липопротеидов. Она достаточно прочна и может обеспечить временное существование клетки без оболочки. Толщина цитоплазматической мембраны составляет около 75 Å. Цитоплазматическая мембрана составляет до 20 % сухой массы клетки. Между плазматической мембраной и клеточной стенкой имеется связь в виде десмозов – мостиков.

Цитоплазматическая мембрана часто дает инвагинации – впячивания внутрь клетки. Эти впячивания образуют в цитоплазме особые мембранные структуры, названные мезосомами. Данные структуры выполняют у бактерий самые различные функции. Одни из этих структур – аналоги митохондрий. Другие выполняют функции эндоплазматической сети или аппарата Гольджи. Путем инвагинации цитоплазматической мембраны образуется также фотосинтезирующий аппарат бактерий.

В цитоплазме бактерий содержатся рибосомы – белоксинтезирующие частицы диаметром 200 Å. В клетке их насчитывается более тысячи. Состоят рибосомы из РНК и белка. Рибосомы являются центрами синтеза белка в клетке. При этом они часто соединяются между собой, образуя агрегаты, называемые полирибосомами или полисомами.

В цитоплазме бактерий содержатся гранулы различной формы и размеров. Они состоят из соединений, которые служат источником энергии и углерода.

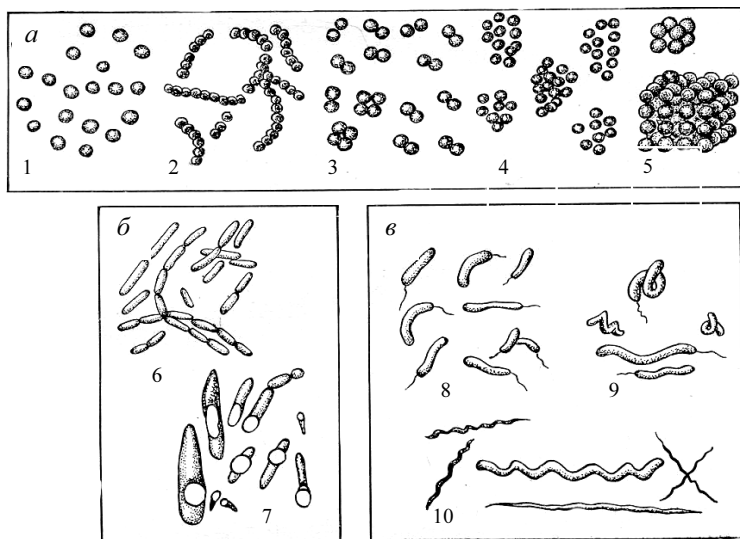
Эти запасные вещества образуются, когда организм снабжается достаточным количеством питательных веществ, и, наоборот, используются, когда организм попадает в условия, менее благоприятные в отношении питания.

Помимо различных структурных компонентов, цитоплазма состоит из жидкой части – растворимой фракции. В ней содержатся белки, различные ферменты, т-РНК, некоторые пигменты и низкомолекулярные соединения – сахара, аминокислоты.

В центральной части клетки локализовано ядерное вещество – дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК). Бактерии представлены особым типом клеток, лишенных истинного ядра, окруженного ядерной мембраной. Аналогом ядра у бактерий является нуклеоид – ДНК-содержащая плазма, не отграниченная от цитоплазмы мембраной. Микроорганизмы, не имеющие настоящего ядра, а обладающие его аналогом, относятся к прокариотам. В клетках большинства бактерий основное количество ДНК сконцентрировано в одном или нескольких местах.

У бактерий ДНК упакована менее плотно, в отличие от истинных ядер; нуклеоид не обладает мембраной, ядрышком и набором хромосом. Бактериальная ДНК не связана с основными белками – гистонами и в нуклеоиде расположена в виде пучка фибрилл. У бактерий имеется одна хромосома, каждый участок которой – ген – ответственен за отдельное наследственно закрепленное свойство бактерий.

Основными формами бактерий являются шаровидная, палочковидная и извитая (рис. 1.2).



Р и с. 1.2. Формы бактерий: *а* – шаровидные: 1 – микрококки; 2 – стрептококки; 3 – диплококки и тетракокки; 4 – стафилококки; 5 – сарцины; *б* – палочковидные: 6 – палочки без спор; 7 – палочки со спорами; *в* – извитые: 8 – вибрионы; 9 – спириллы; 10 – спирохеты

Шаровидные бактерии – кокки – имеют обычно форму шара, но встречаются и уплощенные, слабоовальной формы. В этой группе можно выделить несколько более мелких подгрупп: микрококки (одиночные клетки); диплококки (парные клетки); тетракокки (четыре клетки); стрептококки (цепочки); сарцины (неправильная форма, напоминающая грозди винограда).

Палочковидные (цилиндрические) бактерии могут быть одиночными, парными (диплобактерии) или составлять цепочки по три-четыре клетки (стрептобактерии). Соотношение между длиной и толщиной палочек бывает самым различным.

Извитые (изогнутые) бактерии различаются по длине, толщине и степени изогнутости. Палочки, изогнутые в виде запятой, называются вибрионами; палочки с одним или несколькими завитками (в виде штопора) – спириллами. Бактерии спиралевидные с двумя периплазматическими жгутиками, по одному на каждом конце клетки, называются спирохетами.

Размеры бактерий очень малы – от десятых долей микрона до нескольких микронов. В среднем диаметр тела большинства бактерий 0,5 – 1 мкм, а средняя длина палочковидных бактерий 1 – 5 мкм. Но есть и такие бактерии, величина которых находится на грани видимости в обычные микроскопы (0,1 – 0,2 мкм). Масса бактериальной клетки также очень мала – приблизительно $4 \cdot 10^{-13}$ г.

Форма тела бактерий, как и их размеры, может изменяться под влиянием условий развития. Но при достаточно стабильных условиях они сохраняют присущие данному виду свойства, приобретенные ими в процессе эволюции.

Различают подвижные и неподвижные виды бактерий. Шаровидные бактерии, за редким исключением, не способны к передвижению, среди палочковидных имеются подвижные и неподвижные формы, изогнутые бактерии все подвижны. Движение обычно осуществляется с помощью жгутиков, которые представляют собой спирально закрученные, тонкие нити белковой природы, способные

сокращаться (рис. 1.3). Каждая нить состоит из нескольких тонких волоконцев, скрученных вместе. Жгутики некоторых бактерий достигают значительной длины, превосходящей в десятки и более раз длину клетки, но у большинства их длина 5 – 10 мкм, а толщина – 0,01 – 0,03 мкм, то есть ниже разрешающей способности светового микроскопа. Увидеть их можно



Р и с. 1.3. Жгутики бактерий

только после специальных методов обработки или в электронный микроскоп.

Характер и скорость движения у разных видов бактерий неодинаковы. Подвижность может быть утрачена под влиянием неблагоприятных условий жизни, при старении клеток. Жгутики легко отрываются при механических воздействиях.

Размножаются бактерии обычно путем деления клетки пополам. При этом в средней ее части путем кольцевидного вставания оболочки образуется пе-

регородка, которая, расщепляясь, разделяет клетку на две новые. Перегородка может возникнуть и не в центре клетки, в этом случае новые клетки получают неодинакового размера. Делению клетки предшествуют значительные изменения в ней – перегруппировка содержимого, ядерной субстанции, включений и др. У шаровидных бактерий перегородка может проходить по любому из диаметров клетки. Палочковидные и извитые формы образуют ее перпендикулярно их длинной оси.

Характерной особенностью бактерий является способность чрезвычайно быстро размножаться: при благоприятных условиях через каждые 20 – 30 мин их количество может удваиваться. При таком интенсивном размножении в течение суток появится около 60 поколений одной клетки и их количество достигнет огромных величин. Теоретически из одной клетки массой около $2,5 \cdot 10^{-12}$ г за 2 – 4 сут. может образоваться биомасса порядка 10^{10} т и более. Однако в реальности этого не происходит, так как деление подавляется различными ограничивающими факторами. На скорость размножения бактерий влияют состав питательной среды, температура и другие условия жизни.

Питание микроорганизмов осуществляется в результате диффузии растворенных веществ в клетку за счет разных их концентраций внутри и вне организма, причем мембрана клетки пропускает нужные элементы, задерживая вредные. Клетки у бактерий прокариотического типа. У прокариот (в частности, бактерий) отсутствует оформленное ядро, ядерная ДНК не отделена от цитоплазмы, мембранные структуры не замкнуты, не образуют вторичных полостей в клетке, отсутствует движение цитоплазмы. В связи с указанными различиями прокариоты выделены в системе живых организмов в отдельное царство.

Бактерии различаются по используемым ими источникам энергии и углерода. Те из них, которые в качестве источника энергии используют свет, относятся к фототрофам. У бактерий-хемотрофов источником энергии являются окислительно-восстановительные реакции. Организмы, у которых донорами электронов в энергетическом процессе служат неорганические вещества, называются литотрофами, а организмы, использующие в качестве источника электронов органические вещества, относятся к органотрофам.

В зависимости от источника углерода, используемого в качестве строительного материала, бактерии, как и другие живые организмы, делятся на автотрофы (единственный источник углерода для построения вещества тела – углекислота) и гетеротрофы (источники углерода – готовые органические соединения). Последняя группа бактерий играет особенно значительную роль в процессе возникновения биоповреждений строительных и промышленных материалов.

Большое значение для осуществления жизнедеятельности бактерий имеет и процесс дыхания. По этому признаку они делятся на аэробные, нуждающиеся в кислороде, и анаэробные, способные к дыханию без использования свободного кислорода.

Важнейшими факторами, влияющими на жизнь бактерий, являются температура и реакция среды. В зависимости от температурного интервала жизнедеятельности микроорганизмы делят на три группы: психрофилы (холодолю-

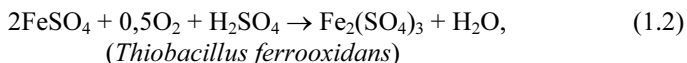
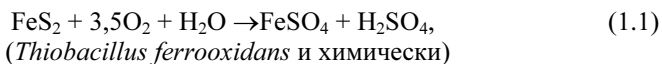
бивые) – 0 – 10 °С с оптимум 5 °С; мезофилы (предпочитающие средние температуры) – соответственно 10 – 40 °С и 25 °С и термофилы (теплолюбивые) – 40 – 80 °С и 60 °С. При более высокой температуре микроорганизмы погибают, что используется на практике для их частичного или полного уничтожения. Так, при пастеризации (нагрев до 60 – 70 °С в течение 5 – 10 мин) уничтожаются вегетативные формы микробов, а при стерилизации (нагрев до 100 – 130 °С в течение 20 – 40 мин) – практически все формы.

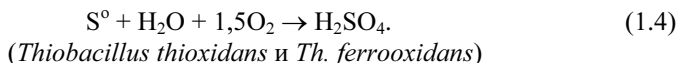
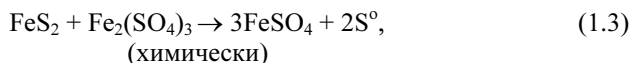
Бактерии в очень кислых и очень щелочных средах погибают. Оптимальными для их роста являются нейтральные или слабощелочные среды (рН = 7,0...7,5).

Бактерии развиваются при наличии жидких сред, т. е. на материалах и изделиях, достаточно увлажненных или погруженных в жидкость, что характерно, например, для градирен, коллекторов, трубопроводов и т. д. Наиболее активными коррозионными агентами являются тионовые и нитрифицирующие бактерии, создающие кислые агрессивные среды, а также сульфатредуцирующие бактерии, образующие коррозионно-активные метаболиты (NH₃, CO₂, H₂S, органические кислоты). Кроме того, в процессе биоповреждения различных материалов могут участвовать и такие группы бактерий, как железобактерии, аммонифицирующие, нитрифицирующие, денитрифицирующие, водородоокисляющие, углеводородоокисляющие, целлюлозоразрушающие и т. д. Тионовые и нитрифицирующие бактерии, а также железобактерии являются возбудителями аэробной коррозии, которая наблюдается в тех случаях, когда имеется достаточное количество свободного или растворенного в воде кислорода. Аэробной коррозии подвержены водосточные бетонные и водопроводные стальные трубы, насосы и различное оборудование в шахтах, стальные конструкции подземных сооружений, каменные и бетонные сооружения и т. д.

В результате жизнедеятельности тионовых и нитрифицирующих бактерий создаются агрессивные коррозионные среды за счет накопления серной и азотной кислот – конечных продуктов их метаболизма. Тионовые бактерии ответственны за окисление различных восстановленных соединений серы. Исследованиями отечественных и зарубежных микробиологов доказано, что основная роль в окислении широкого круга соединений серы до сульфатов принадлежит представителям рода *Thiobacillus*. Тионовые бактерии, обладающие мощным ферментативным аппаратом, по своей окислительной активности могут конкурировать с процессами окисления сульфидов металлов, элементарной серы, сульфата закиси железа. Известно, что скорость бактериального окисления дисульфида железа в условиях кислой среды в сотни тысяч, а то и в миллионы раз выше скорости химического окисления.

В процессе бактериального окисления пирита протекают следующие химические реакции, в результате которых происходит активное снижение рН среды за счет серной кислоты :





Кроме нанесения огромного материального ущерба в результате коррозии материалов, деятельность тионовых бактерий приводит к загрязнению Мирового океана серной кислотой.

Возникновение кислых агрессивных сред возможно и в результате деятельности нитрифицирующих бактерий, что связано с образованием азотной кислоты за счет окисления аммиака, происходящего в две фазы. В первой аммиак окисляется до азотистой кислоты:



Возбудителями этой фазы нитрификации являются виды *Nitrosomonas*, *Nitrosocystis* и др. Вторая фаза нитрификации сопровождается окислением азотистой кислоты до азотной и вызывается *Nitrobacter vinogradskii*:



Деятельность нитрифицирующих бактерий чаще всего приводит к разрушению строительных пористых материалов, состоящих из неорганических соединений кальция, кремния и алюминия. Эти бактерии окисляют аммиак, имеющийся в воздухе или дождевой воде, до нитратов или азотной кислоты, которые, взаимодействуя с карбонатом кальция, превращают последний в растворимую форму $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Образующийся азотнокислый кальций легко выщелачивается из камня, снижая сцепление между частицами кремния.

Участие железобактерий (*Leptothrix*, *Crenothrix*, *Gallionella*, *Siderocapsa*, *Ochrobium*, *Siderophilum* и др.) в коррозионном процессе является причиной возникновения дифференцированно аэрируемых ячеек. Эти бактерии образуют на внутренней поверхности водопроводных труб слизистые скопления (каверны), участки металла под которыми плохо аэрируются и действуют как анод, в то время как вентилируемые участки имеют более высокий потенциал и действуют как катод. В анодной зоне металлическое железо растворяется в соответствии с уравнением $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}$, т. е. начинается процесс коррозии.

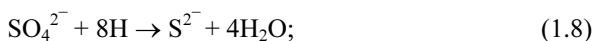
Анаэробная коррозия наблюдается в анаэробных нейтральных условиях, которые создаются в водоупорных глинистых и болотистых почвах или сильно загрязненных органическими веществами водах. В результате этой коррозии выходят из строя трубопроводы, различные виды оборудования нефтяной и газовой промышленности, бензобаки, цистерны, нефтехранилища и др.

Основными возбудителями анаэробной коррозии являются сульфатредуцирующие бактерии, ответственные за восстановление сульфатов до сероводорода и относящиеся к родам *Desulfovibrio* и *Desulfotomaculum*:



Эти бактерии используют поляризованный водород с поверхности металлов для диссимиляторных процессов, т. е. для сульфатредукции. В условиях анаэробно-сульфатредуцирующие бактерии действуют как заменитель кислорода в деполяризационной реакции, позволяя, таким образом, протекать коррозии.

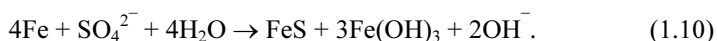
Каждая деполяризация при участии бактерий происходит следующим образом:



образование продуктов коррозии:



суммарная реакция:



1.2. МИЦЕЛИАЛЬНЫЕ ГРИБЫ

Отечественная и зарубежная статистика показывает, что из микроорганизмов наибольшее повреждающее воздействие на промышленные и строительные материалы оказывают микроскопические грибы, высокая деструктирующая активность которых обусловлена способностью адаптироваться к материалам различной химической природы, что связано, прежде всего, с наличием у них хорошо развитого мобильного ферментного комплекса.

Грибы – обширная группа организмов, насчитывающая около 100 тыс. видов. Они занимают особое положение в системе органического мира, представляя особое царство, наряду с царствами животных и растений. Они лишены хлорофилла и поэтому требуют для питания готовое органическое вещество (их называют гетеротрофными). По наличию в обмене мочевины, хитина в оболочке клеток, запасного продукта – гликогена, а не крахмала – они приближаются к животным. С другой стороны, по способу питания путем всасывания (адсорбтивное питание), а не заглатывания пищи, по неограниченному росту они напоминают растения.

Грибы весьма разнообразны по внешнему виду, местам обитания и физиологическим функциям. Однако у них есть и общие черты. Основой вегетативного тела грибов является мицелий, или грибница, представляющая собой систему тонких ветвящихся нитей, или гиф, находящихся на поверхности субстрата, где живет гриб, или внутри него. Обычно грибница бывает весьма обильна, с большой общей поверхностью. Через нее осмотическим путем происходит всасывание пищи. У грибов, условно называемых низшими, грибница не имеет перегородок (неклеточная); у некоторых тело представляет голый протопласт; у остальных грибница разделена на клетки.

Клетка грибов в большинстве покрыта твердой оболочкой – клеточной стенкой. Ее нет у зооспор и вегетативного тела некоторых простейших гри-

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ОСНОВНЫЕ БИОДЕСТРУКТОРЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	5
1.1. Бактерии.....	5
1.2. Мицелиальные грибы	12
1.3. Актиномицеты.....	22
2. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ	27
2.1. Классификация методов исследования биологической стойкости	27
2.2. Исследование устойчивости материалов к биообрастаниям.....	27
2.3. Исследование изменения физико-механических свойств материалов под воздействием микроскопических организмов и продуктов метаболизма.....	28
2.4. Структурный анализ материалов.....	30
2.5. Математическое моделирование при исследовании свойств композиционных материалов	31
3. БИОДЕГРАДАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ С БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫМИ СРЕДАМИ	37
3.1. Металлические материалы.....	37
3.2. Бетоны на цементных, гипсовых, известковых и иных связующих	41
3.3. Древесные и другие целлюлозосодержащие материалы.....	47
3.4. Полимерные строительные материалы.....	49
3.5. Лакокрасочные материалы	53
3.6. Резинотехнические материалы.....	58
4. МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ.....	61
4.1. Механизмы разрушения органическими кислотами	61
4.2. Механизмы разрушения неорганическими кислотами	63
4.3. Механизмы разрушения ферментами.....	67
4.4. Разрушение композитов в модельной биологической среде.....	72
5. ПОВЫШЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ	73
5.1. Классификация методов защиты от биоповреждений	73
5.2. Физические методы защиты.....	75
5.3. Химические методы защиты.....	77
5.3.1. Дезинфекция и стерилизация воздуха и внутренних поверхностей производственных помещений	77
5.3.2. Защита лакокрасочных материалов и покрытий от поражения микроорганизмами	79

5.3.3. Защита некоторых строительных материалов от микробиологической коррозии	82
5.3.4. Защита металлов от грибной коррозии	88
5.3.5. Защита древесины от биоповреждений.....	90
5.4. Биологические методы защиты	94
6. БИОСТОЙКОСТЬ И ЕЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА	97
6.1. Экономические последствия биоповреждений.....	97
6.2. Общие принципы определения экономической эффективности затрат на защиту от биоповреждений	105
6.3. Методика определения экономической эффективности проектных решений защиты от биоповреждений.....	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	121

Учебное пособие

ЕРОФЕЕВ Владимир Трофимович
СМИРНОВ Василий Филиппович
МОРОЗОВ Евгений Анатольевич и др.

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

*Печатается в авторской редакции
в соответствии с представленным оригинал-макетом*

Компьютерный дизайн обложки: *Романова Н.С.*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Сдано в набор 17.09.07

Подписано к печати 17.11.07. Формат 60x90 1/16

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. 8 п.л. Тираж 1000 экз. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511
тел., факс: (495)183-56-83, e-mail: iasv@mgsu.ru, <http://www.iasv.ru/>